Mejora de la precisión geoespacial en sistemas de detección urbana desde una perspectiva de Ingeniería de Software orientada a la calidad - Caso Geoviality

Francisco Antonio Muñoz Barraza

francisco.munozb@usm.cl

Profesor guía: Marcello Visconti

Resumen: El sistema Geoviality utiliza Inteligencia Artificial para detectar baches, pero depende de coordenadas GPS para geolocalizar los eventos, lo que puede generar errores debido a interferencias y a la velocidad del vehículo durante la captura. Esto puede llevar a asignaciones incorrectas en calles cercanas, ya que el sistema asocia los puntos GPS a la calle más próxima sin considerar el camino recorrido, afectando así la calidad de los datos y del software. Este trabajo aborda dicha problemática desde la Ingeniería de Software, enfocándose en mejorar la precisión de los datos geoespaciales como un aspecto clave de la calidad del producto. Para ello, se diseña e implementa un módulo correctivo basado en un enfoque Map-Aware Particle Filter, capaz de refinar las coordenadas GPS utilizando no solo la medición del sensor, sino también otros datos obtenidos del dispositivo y el contexto geométrico de la red vial. La solución se integra al sistema existente sin alterar su flujo principal y su efectividad se evalúa mediante métricas cuantitativas y con referencia al modelo de calidad ISO/IEC 25010, especialmente en términos de adecuación funcional, confiabilidad y eficiencia temporal. Los resultados obtenidos muestran importantes reducciones de error, además de la corrección de puntos anteriormente asignados a calles incorrectas. Con esta propuesta, Geoviality incrementa significativamente la precisión de su capa geoespacial y aumenta su confiabilidad en escenarios reales.

Keywords: GPS, error, calidad, Ingeniería de Software, ubicación, filtrado de partículas.

1. Introducción

En el mundo, los baches en las calles es un problema recurrente, el cual requiere medidas de mitigación continuas en el tiempo. Por ejemplificar, en Inglaterra se estima que en promedio existen 6 baches por milla en las carreteras (BBC, 2024), los cuales pueden llegar a provocar problemas mecánicos en los vehículos o incluso accidentes de tráfico, aunque este último con una menor probabilidad.

En Chile, la situación no es distinta, la descentralización de la responsabilidad de arreglar los baches en distintas instituciones hace que múltiples calles en distintas ciudades estén en mal estado, lo cual puede persistir por años antes de una solución.

A partir de este problema, se desarrolló Geoviality, un software basado en Inteligencia Artificial que: detecta, clasifica y visualiza los baches presentes en cada calle, generando un mapa interactivo que ayuda a planificar y organizar su posterior reparación.

El sistema de detección automática de baches Geoviality se apoya en coordenadas GPS que pueden presentar imprecisiones en la ubicación de los eventos registrados. Como señalan (E. D. Kaplan, 2006) y (Zandbergen, 2009) los errores en la medición de coordenadas GPS pueden deberse a múltiples factores como las condiciones atmosféricas, el entorno urbano y el movimiento del receptor. En particular, en ciudades, los errores pueden superar los 10 metros, afectando

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Mejora de la precisión geoespacial en sistemas de detección urbana desde una perspectiva de Ingeniería de Software orientada a la calidad - Caso Geoviality

Nombre del candidato(a): Francisco Antonio Muñoz Barraza

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Informática

Campus: San Joaquin **Departamento:** Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Marcello Visconti Zamora, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 21-10-2026 **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21-10-2026 **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

significativamente la precisión espacial en sistemas embarcados en vehículos que requieren localización en tiempo real.

Como consecuencia de la situación anteriormente descrita, los baches pueden ser ubicados erróneamente en calles adyacentes, lo que afecta la confiabilidad del sistema y compromete la calidad de los datos generados. Este problema se agrava al considerar que el GPS, por sí solo, no es suficiente para lograr una geolocalización precisa en tiempo real bajo condiciones urbanas densas, lo cual ha motivado el uso de modelos computacionales y técnicas de fusión de sensores para compensar estas deficiencias. (Groves, 2008)

Actualmente, el sistema desarrollado no incorpora un mecanismo correctivo que mejore la precisión de las mediciones GPS. Esto plantea la necesidad de implementar un proceso que, desde la Ingeniería de Software orientada a la calidad, permita corregir y refinar las coordenadas obtenidas, utilizando métodos computacionales y/o tecnologías para aumentar la exactitud de los registros.

El problema de ingeniería anteriormente expuesto es complejo, ya que involucra tanto aspectos técnicos como de calidad del software, en donde la solución debe integrarse a un sistema que opera en tiempo real, lo que restringe el uso de métodos costosos en tiempo de cómputo. Lo anterior obliga a que el método correctivo diseñado sea eficiente, preciso y compatible con la arquitectura actual del sistema Geoviality, lo cual es importante para no comprometer su rendimiento

1.1. Objetivos

El objetivo general es diseñar e implementar un módulo/proceso correctivo basado en métodos computacionales para mejorar la precisión de los datos GPS utilizados en el sistema de detección de baches Geoviality, contribuyendo a la calidad del software desde el enfoque de Ingeniería de Software utilizando la norma ISO/IEC 25010:2023 (International Organization for Standardization, 2023). A lo anterior se suma objetivos específicos, los cuales son:

- Desarrollar un modelo correctivo que procese los datos GPS e identifique ubicaciones erróneas mediante técnicas computacionales y/o tecnologías que sean útiles en el análisis geográfico, validándolo mediante pruebas independientes del software Geoviality.

- Implementar dicho modelo como un componente modular dentro del sistema Geoviality, asegurando su integración sin afectar el rendimiento general y realizando la corrección de las ubicaciones erróneas encontradas en las mediciones reales.
- Evaluar la mejora en la precisión de los puntos GPS antes y después de aplicar la corrección basándose principalmente en los resultados visualizados en la interfaz principal del sistema

1.2. Resumen solución propuesta

La solución propuesta aborda la problemática de la imprecisión geoespacial en Geoviality mediante la incorporación de un proceso correctivo orientado a mejorar la calidad de las coordenadas GPS capturadas desde dispositivos móviles. Para no modificar el flujo actual del sistema se diseña un módulo independiente que permite corregir los puntos obtenidos una vez finalizada cada ruta.

La propuesta se basa en la utilización de un enfoque computacional Map-Aware Particle Filter, el cual combina información proveniente del receptor GNSS, sensores inerciales del dispositivo móvil y el contexto geoespacial entregado por la red de calles de la ciudad. Este enfoque permite modelar el movimiento del vehículo, suavizar el ruido propio del GPS y restringir las estimaciones a posiciones físicamente plausibles según la geometría y topología de las calles.

Con lo anterior se busca mejorar la precisión y confiabilidad de los datos geoespaciales sin afectar el rendimiento del sistema en tiempo real, alineándose con los principios de calidad definidos por el modelo ISO/IEC 25010:2023, particularmente en las dimensiones de adecuación funcional, eficiencia de rendimiento y confiabilidad.

1.3. Estructura del documento

El documento se organiza de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se presenta la introducción del trabajo, incluyendo el contexto general del problema, los objetivos planteados, la solución propuesta y la estructura del documento.

El Capítulo 2 desarrolla el estado del arte, abordando los modelos de calidad de software relevantes, las fuentes de error del GPS en entornos urbanos y los principales métodos existentes para la corrección de trayectorias geoespaciales, incluyendo enfoques tradicionales y basados en software.

En el Capítulo 3 se describe el planteamiento de la solución, comenzando con el estado general del sistema Geoviality y continuando con las mejoras propuestas en la aplicación móvil, el backend y la plataforma web. Posteriormente, se detalla el diseño e integración del módulo correctivo basado en un Map-Aware Particle Filter.

El Capítulo 4 presenta los resultados obtenidos, incluyendo visualizaciones comparativas, análisis cuantitativos por ruta y un análisis global del desempeño del módulo correctivo, apoyado en métricas objetivas de precisión geoespacial.

Finalmente, en el Capítulo 5 se exponen las conclusiones generales del trabajo, junto con las principales limitaciones identificadas y posibles líneas de trabajo futuro.

2. Estado de arte

2.1. Precisión de los datos en sistemas urbanos

2.1.1. Concepto de calidad de datos

El concepto de calidad de datos es muy importante en la informática y ha sido trabajado desde distintas perspectivas, abarcando tanto la ciencia de datos como la ingeniería de software y los sistemas de información.

La norma ISO/IEC 25012:2008 define la calidad de datos como *"el grado en el que las características inherentes de los datos cumplen con las necesidades implícitas o explícitas cuando se utilizan bajo condiciones específicas"* (ISO/IEC, 2008). Este estándar propone un modelo de calidad que distingue entre dimensiones internas, las cuales se refieren a las propiedades intrínsecas del dato, y las dimensiones externas, relacionadas con su uso dentro de un contexto determinado. Este modelo se mantiene vigente y continúa siendo actualizado para adaptarse a los nuevos desafíos tecnológicos.

La importancia de garantizar la calidad de los datos radica en que estos constituyen la base para la toma de decisiones y por consiguiente en la operación de sistemas informáticos, dado que los datos permiten generar las políticas correctas y necesarias, por ejemplo, en una empresa. Por el otro lado, datos de baja calidad pueden llevar a diagnósticos incorrectos, predicciones poco confiables o fallos en procesos críticos.

2.1.2. Dimensiones de calidad de datos

Siguiendo la norma ISO/IEC 25012:2008, los datos poseen diversas dimensiones de calidad que permiten evaluar su grado de adecuación en el contexto en el cual se usen. Estas dimensiones también soy importantes en el modelo de calidad escogido para esta tesis y entre las más relevantes se encuentran las siguientes:

Exactitud (Accuracy): Esta dimensión se refiere al grado en que los datos reflejan con fidelidad la realidad que buscan representar. Lo anterior indica que un dato es exacto cuando su valor coincide, dentro de un margen aceptable de error, con el valor real o esperado.

Consistencia (Consistency): Esta dimensión se refiere a la ausencia de contradicciones en un conjunto de datos, los cuales pueden ser de distintas fuentes o solo una. La consistencia de los datos asegura la coherencia semántica de la información y facilita la integración de distintas bases de datos.

Credibilidad (Credibility): Esta dimensión se refiere al grado en el que los atributos de los datos tienen atributos que se consideran ciertos y creíbles en un contexto de uso específico. Al mismo tiempo esta dimensión está relacionada con el concepto de autenticidad, la cual es la veracidad de los orígenes de datos.

2.1.3. Importancia de la precisión en aplicaciones urbanas inteligentes

Cuando se habla de aplicaciones urbanas inteligentes, de inmediato se debe relacionar con el concepto “Smart Cities”, ya gran parte de los servicios urbanos dependen de información en tiempo real, ya sea esta geoespacial o de algún otro tipo. En el caso geoespacial, una localización precisa no solo permite describir el estado actual de la ciudad, sino también anticipar situaciones y optimizar la gestión de recursos, los cuales en un país como Chile siempre son limitados.

En este contexto, la precisión de los datos se transforma en un aspecto clave en distintos ámbitos, tales como lo son: la movilidad urbana o la planificación y mantenimiento de la infraestructura urbana, el cual es el aspecto más relacionado con este trabajo.

En primer lugar, la movilidad urbana es uno de los ámbitos más sensibles a la precisión de los datos, en el cual se pueden encontrar: sistemas de navegación, sistemas gestión del tráfico o comúnmente el transporte público requieren posiciones exactas de vehículos. Una imprecisión en las coordenadas GPS puede provocar errores en el cálculo de rutas y a su vez estimaciones de tiempo de llegada inexactas. El ejemplo más cercano que se tiene es la aplicación RED del sistema público de transporte de Santiago, ya que esta aplicación posee los datos de cada bus en circulación en la ciudad, con el respectivo tiempo de llegada a cada parada.

Por otro lado, la planificación y mantenimiento de la infraestructura urbana depende de datos espaciales confiables. En este caso una aplicación como Geoviality, la cual tiene la función de la detección de baches requiere que los puntos registrados correspondan efectivamente al lugar donde ocurre la incidencia. Un error en la georreferenciación puede ubicar un problema en una calle distinta, afectando la eficacia de la respuesta en términos de la planificación y posterior reparación.

Para este punto se tiene en cuenta la investigación de (Scolamiero, Boccardo, & La Riccia, 2025), quienes proponen un sistema móvil de mapeo para el monitoreo de la infraestructura urbana. Este enfoque combina tecnologías más avanzadas que las empleadas por Geoviality, tales como GNSS (Global Navigation Satellite System), IMU (Inertial Measurement Unit), LiDAR (Light Detection and Ranging) y cámaras de alta resolución, lo que permite mapear el entorno y generar un modelo tridimensional detallado del espacio urbano.

Por lo anterior, la precisión geoespacial no solo es un atributo técnico de los datos, sino que es un factor determinante para la eficacia, seguridad y credibilidad de los sistemas urbanos inteligentes. Datos inexactos o poco precisos pueden generar desconfianza y limitar la adopción de soluciones inteligentes en la ciudad.

2.2. Modelos de calidad de software aplicables

En la ingeniería de software la calidad de software es un ámbito fundamental, el cual comúnmente se aborda desde distintos modelos y estándares que han surgido a lo largo del tiempo. De ese modo, cada modelo ha propuesto dimensiones y métricas particulares para evaluar la calidad, dependiendo de su contexto de aplicación. Para este trabajo se revisaron diversos modelos con el fin de determinar su pertinencia para Geoviality. Entre los principales se encuentran:

Modelo de Boehm (1978): Este modelo define características de alta, media y baja jerarquía, destacando atributos como utilidad, portabilidad y mantenibilidad, pero es limitado para alcanzar los objetivos planteados en este trabajo.

Modelo FURPS (1992): Este modelo representa una evolución importante en los modelos de calidad, en el cual se divide la calidad en Funcionalidad, Usabilidad, Fiabilidad, Rendimiento y Soportabilidad, los cuales son aspectos que también se encuentran en los modelos actuales.

Modelo ISO/IEC 9126: Predecesor del estándar actual, define seis características principales: funcionalidad, fiabilidad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad y portabilidad. Aunque más completo que los modelos anteriores, fue reemplazado por el estándar ISO/IEC 25010 debido a la necesidad de mayor claridad y precisión en las definiciones.

ISO/IEC 25010:2023: Es el estándar vigente y el sucesor del ISO/IEC 9126. Amplía el modelo previo, incorporando ocho características principales y un conjunto más robusto de subcaracterísticas, incluyendo compatibilidad y seguridad. Esta mayor capacidad descriptiva lo convierte en el estándar más adecuado para evaluar la calidad del software en el contexto de este trabajo.

2.2.1. Características relevantes para Geoviality del modelo ISO/IEC 25010:2023

En el caso de Geoviality, un sistema que integra detección mediante IA con datos geoespaciales provenientes de dispositivos móviles, no todas las características del modelo ISO/IEC 25010:2023 resultan igualmente pertinentes. Debido a que el objetivo de este trabajo es mejorar la precisión espacial del sistema y su confiabilidad operacional sin afectar su actual rendimiento, se seleccionaron únicamente aquellas características que impactan directamente en la calidad del dato geoespacial y en su comportamiento dentro del sistema.

En primer lugar, se encuentra la característica *Functional Suitability* (Adecuación Funcional), la cual evalúa la idoneidad del software para cumplir con sus funciones previstas. Dentro de esta característica resultan esenciales la Exactitud funcional, asociada a la correcta representación de los datos procesados, y la Completitud funcional, que asegura que el sistema entrega todas las funciones necesarias para soportar el flujo de detección y corrección geoespacial.

En segundo lugar, la característica Performance Efficiency, en particular su subcaracterística *Comportamiento temporal*, permite analizar si la incorporación del módulo correctivo afecta negativamente el tiempo de respuesta o la velocidad de procesamiento. Dadas las características del sistema Geoviality es importante garantizar que el sistema mantenga un rendimiento estable.

Finalmente, la característica Reliability, y en especial la subcaracterística *Tolerancia a fallos*, resulta crítica en sistemas que dependen de sensores como el GPS. Geoviality debe ser capaz de funcionar correctamente incluso ante lecturas ruidosas, interrupciones o inconsistencias propias del entorno urbano. El módulo correctivo propuesto contribuye directamente a esta característica al suavizar trayectorias, corregir desviaciones y evitar que errores en la lectura original se propaguen hacia la visualización o hacia análisis posteriores.

2.3. Precisión geoespacial y técnicas de mejora del GPS

2.3.1. Fuentes de error en el GPS

El *Global Positioning System* (GPS) es ampliamente utilizado en aplicaciones urbanas debido a su disponibilidad y facilidad de integración. Sin embargo, la precisión de sus coordenadas se ve afectada por diversos factores internos y externos al sistema. Estos errores pueden acumularse y producir desviaciones de varios metros, lo cual es especialmente crítico en escenarios como Geoviality, donde la correcta asociación de un punto GPS a una calle especifica es fundamental para la calidad del producto. Por esta razón, antes de plantear un mecanismo correctivo, es indispensable comprender las principales fuentes de error presentes en las mediciones.

Una de las fuentes más relevantes son los **errores atmosféricos**, producidos cuando la señal GPS atraviesa diferentes capas de la atmosfera para llegar al receptor, principalmente la ionósfera y la tropósfera. En entornos urbanos estos efectos se acentúan y pueden constituir una parte significativa del error total observado.

En la capa de la **Ionósfera** la variación en la densidad de electrones provoca retrasos en la propagación de la señal satelital y puede introducir errores de hasta varios metros en la medición de la distancia.

En la otra capa, la **Tropósfera,** las condiciones meteorológicas como la presión, temperatura y humedad también afectan la velocidad de propagación de la señal, ocasionando errores adicionales.

Lo anterior se respalda en el postulado hecho en el trabajo *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*: *"Los errores atmosféricos, en particular los causados por la ionosfera y la troposfera, introducen retardos en la señal GPS que afectan la exactitud posicional"* (Misra & Enge, 2011).

El segundo tipo de error es el que se conoce por el concepto de **Multipath**, el cual ocurre en ciudades con alta densidad de edificaciones, puentes o vegetación, en donde las señales satelitales pueden rebotar en superficies antes de llegar al receptor, lo cual distorsiona la señal, generando duplicados o retrasos que afectan la estimación de la posición. Sumado a lo anterior, las obstrucciones urbanas reducen la visibilidad de satélites, limitando la geometría de la constelación y disminuyendo la precisión del cálculo de coordenadas.

El posterior diagrama obtenido del libro "GPS: Theory, Algorithms and Applications" (Xu, 2007) visualiza de manera grafica la geometría que produce el efecto multipath. En el caso de Geoviality, estas condiciones son especialmente relevantes, dado que el sistema debe operar en entornos urbanos complejos donde el efecto multipath es frecuente y persistente.

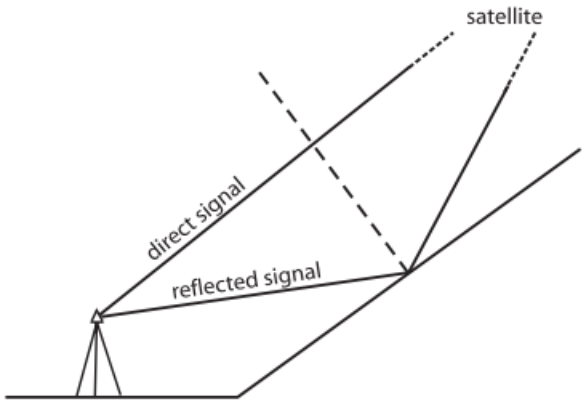


Ilustración 1 Geometria de efecto multipath (Xu, 2007).

El tercer tipo de error proviene de la velocidad de posea el receptor, este factor en aplicaciones vehiculares puede introducir errores adicionales en el cálculo de la posición, debido al desfase en la sincronización de la señal. Un ejemplo de la aplicación de esto es el trabajo de (Weng, Chen, Ding, Liu, & Wang, 2025), donde a pesar de que se enfoca en peatones los resultados muestran que incluso en

condiciones de velocidades moderadas, los errores derivados de obstrucciones y del propio receptor afectan de manera significativa la exactitud transversal de la posición, alcanzando desviaciones de decenas de metros.

Finalmente, también pueden generarse errores por ruido electrónico del receptor o por la calidad del hardware, aunque estos aspectos no serán abordados en este trabajo.

2.3.2. Métodos tradicionales de corrección

A pesar de los numerosos tipos de errores que se pueden producir, la precisión del GPS puede incrementarse aplicando técnicas de corrección que buscan mitigar los errores presentes en la señal. Entre los métodos tradicionales más empleados se encuentran los diferenciales, la fusión sensorial y los enfoques estadísticos, los cuales han sido ampliamente utilizados en contextos de movilidad urbana y sistemas inteligentes.

Los **métodos diferenciales** son principalmente tres: posicionamiento diferencial (DGPS), Sistemas de Aumentación Basados en Satélite (SBAS) y GBAS (Ground-Based Augmentation Systems), los cuales buscan reducir los errores del GPS mediante el uso de estaciones de referencia fijas que conocen su posición real con alta precisión. Estos métodos, aunque efectivos, se utilizan principalmente en aeropuertos, donde existe infraestructura adicional para operarlos. Lo anterior limita su adopción en entornos urbanos de gran escala como el caso de Geoviality. Además, uno de los objetivos del software es cumplir con sus funciones mediante técnicas poco invasivas y de bajo costo, lo cual reduce la conveniencia de estos métodos.

Por otro lado, la **fusión sensorial** se refiere a la combinación de diferentes fuentes de datos para compensar las limitaciones inherentes del GPS en entornos urbanos. Al integrar mediciones complementarias, se logra una posición más robusta y precisa, especialmente en situaciones de túneles o zonas con efecto multipath.

Una de las técnicas más utilizadas es la integración con **IMU (Inertial Measurement Units)**, que permite mantener la trayectoria en periodos de pérdida de señal, aunque requieren corrección debido a la deriva acumulada. Una IMU integra acelerómetros y giróscopos para estimar cambios de posición y orientación mediante navegación inercial. Esta técnica es interesante por los componentes de una IMU, ya que los celulares poseen estos elementos y pueden ser de utilidad para lograr una mayor precisión sin la necesidad de una mayor inversión.

De manera complementaria, la técnica llamada **odometría** aporta estimaciones de desplazamiento basadas en sensores de ruedas o pasos, aunque puede verse afectada por errores en superficies irregulares. Asimismo, el reciente aprovechamiento de las redes 5G ha introducido capacidades avanzadas de

localización con latencias mínimas y alta densidad de antenas, alcanzando precisiones de nivel submétrico.

Comúnmente en la fusión temporal se combinan varias de las técnicas anteriores, esto se puede observar en el trabajo "*Research on GNSS/IMU/visual fusion positioning based on adaptive filtering"* (Liu, y otros, 2024), en donde además de utilizar GPS e IMU, se incorpora una tercera fuente, la odometría visual, lo cual mejora la precisión posicional en escenarios con obstrucciones, comparado con el GNSS solo y el GNSS/IMU tradicionales.

Los últimos métodos tradicionales son los llamados **"métodos estadísticos"**, los cuales son los **filtros de Kalman y de partículas**. Estos métodos son hasta el momento los más interesantes, ya que no necesitan elementos adicionales más allá de los modelos matemáticos de cada filtro, los cuales que se pueden programar en la construcción del módulo.

Primero analicemos el **filtro de Kalman**, el cual es un método determinista-estadístico que combina la información de un modelo dinámico, basado en la predicción posición/velocidad con las medidas observadas (GPS) y funciona bajo la hipótesis de que los errores siguen una distribución gaussiana y que el sistema puede modelarse de manera lineal o casi lineal. En el caso de Geovility, este método permitiría suavizar la trayectoria y mantener la continuidad de los puntos a través de la interpolación. No obstante, tiene sus limitaciones, ya que en muchos casos el vehículo girará en la ciudad, lo cual hará que el movimiento no sea lineal y el método pierda efectividad, esto obligará en caso de usarlo a complementarlo con otros métodos para asegurar el objetivo planteado.

El otro método estadístico es el **filtro de partículas**, considerado una evolución más potente del filtro de Kalman. Esta técnica está diseñada para abordar situaciones en las que el ruido de las mediciones no es gaussiano o el sistema presenta una alta no linealidad, condiciones frecuentes en los entornos urbanos donde opera Geoviality.

El método representa la posición o estado real de un sistema mediante un conjunto de múltiples hipótesis que son llamadas "*partículas"*, en las cuales cada partícula posee una posible ubicación del sistema y un peso asociado que refleja su nivel de credibilidad. A medida que se reciben nuevas mediciones, el algoritmo actualiza dichos pesos, reforzando las partículas que coinciden mejor con las observaciones y descartando las menos probables.

Con lo anterior, el filtro de partículas logra mantener una estimación robusta y precisa incluso en condiciones de alta incertidumbre. Según el trabajo "*Particle filter theory and practice with positioning applications"* (Gustafsson, 2010), este enfoque ofrece un desempeño superior al de los filtros lineales tradicionales, como lo es el

filtro de Kalman, al permitir el seguimiento confiable en escenarios de navegación complejos y con ruido no gaussiano.

A pesar de su precisión en entornos no lineales, el filtro de partículas presenta ciertas limitaciones. En primer lugar, su desempeño depende del número de partículas utilizadas, ya que un conjunto insuficiente puede generar estimaciones imprecisas, mientras que, por el otro lado, un número excesivo incrementa significativamente el costo computacional (Gustafsson, 2010). En el contexto de aplicaciones urbanas como Geoviality, esta limitación puede implicar la necesidad de optimizar la cantidad de partículas y considerar complementos para generar mejores resultados.

En este punto surge una variante particularmente relevante para este trabajo: el enfoque **Map-Aware Particle Filter**. Este método extiende el filtro de partículas tradicional incorporando información de la red vial como parte del proceso de ponderación de partículas. En lugar de basarse únicamente en la señal GPS y en el modelo de movimiento, el algoritmo integra la distancia a la calle más cercana, el rumbo local de la vía y restricciones topológicas como sentidos de tránsito o geometría de intersecciones. Lo anterior permite penalizar ubicaciones físicamente improbables y favorecer aquellas coherentes con el entorno urbano real, incrementando así la verosimilitud de las trayectorias estimadas. Un ejemplo es el trabajo “Map-Aware Particle Filter for Localization” (Rechy Romero, Borges, Pfrunder, & Elfes, 2018) donde se introduce explícitamente el uso de la estructura del mapa para ajustar las hipótesis de las partículas. Este enfoque demuestra que incorporar conocimiento del mapa no solo mejora la precisión posicional, sino que también incrementa la estabilidad de la estimación en espacios densos o con obstrucciones.

2.3.3. Métodos basados en software e inteligencia artificial

Además de los métodos tradicionales, existen enfoques más recientes basados en software e inteligencia artificial que buscan mejorar la precisión del posicionamiento GPS mediante procesamiento computacional. A diferencia de las técnicas dependientes del hardware del receptor, estos métodos utilizan información del entorno, modelos predictivos o procesamiento en tiempo real para refinar las coordenadas. Dentro de este grupo destacan tres líneas principales: *map matching*, corrección mediante *machine learning* y procesamiento geoespacial en tiempo real.

El primer método es **Map Matching**, el cual es una técnica ampliamente utilizada para mejorar la precisión del posicionamiento en entornos urbanos, al ajustar los puntos GPS registrados a la calle más probable. En lugar de aceptar las coordenadas crudas provenientes del receptor, este método compara la trayectoria medida con la geometría de las calles almacenadas en una base cartográfica. De esta forma, se

determina en qué calle es más probable que se encuentre el objeto o vehículo que generó la medición.

El *map matching* es uno de los métodos más extendidos para mejorar la precisión urbana, ya que ajusta los puntos GPS a la calle más probable comparando la trayectoria observada con la geometría de la red vial. Sus algoritmos pueden ser geométricos (distancia punto-calle), topológicos (conectividad entre segmentos) o probabilísticos, estos últimos basados en filtros como Kalman o partículas, que manejan mejor la incertidumbre típica de entornos densos y con efecto multipath. Uno de los trabajos más influyentes es "*A general map matching algorithm for transport telematics applications"* (Quddus, 2003), que integra la geometría y topología vial para asignar trayectorias con mayor exactitud, sentando bases de los métodos modernos de transporte inteligente.

Actualmente, Geoviality emplea un enfoque geométrico complementado con un *buffer* espacial, suficiente para escenarios simples, pero susceptible a errores en zonas con calles paralelas o intersecciones estrechas, donde incluso pequeñas desviaciones del GPS pueden asignar el punto a la calle incorrecta.

Otro enfoque moderno es la corrección basada en *machine learning*, que entrena modelos con datos históricos para aprender patrones de error y predecir la ubicación real del dispositivo. Aunque promete buenos resultados, depende fuertemente de la calidad y volumen de los datos de entrenamiento, la diferencia en la configuración urbana puede hacer que deban existir modelos por ciudad y además este método suele requerir recursos computacionales elevados, lo que escapa a los alcances prácticos de este trabajo.

Finalmente, el procesamiento geoespacial en tiempo real permite analizar y ajustar posiciones a medida que los sensores las generan, reaccionando a errores inmediatamente. Estas arquitecturas suelen apoyarse en sistemas distribuidos como Kafka, Spark o AWS Kinesis, adecuados para grandes volúmenes de datos y baja latencia. Sin embargo, su implementación implica altos costos computacionales y complejidad operativa, lo que limita su adopción en soluciones de bajo costo como Geoviality.

3. Planteamiento de Solución

2.1. Estado general del sistema actual

Tal como se mencionó previamente, Geoviality es un sistema orientado a la detección y gestión de irregularidades urbanas mediante el uso de inteligencia artificial, sensores y tecnologías geoespaciales. Sin embargo, aún no se ha detallado la arquitectura que permite su funcionamiento. El sistema se compone de tres módulos principales: una aplicación móvil para la captura de datos en terreno, un backend encargado del procesamiento y

almacenamiento de la información, y una plataforma web que visualiza los resultados obtenidos.

La **aplicación móvil** está desarrollada en React Native con Expo. En ella, el usuario registra imágenes de la vía pública utilizando la cámara del dispositivo, mientras el sistema recopila simultáneamente datos del GPS. Cada registro genera un paquete de información que incluye la imagen capturada, sus coordenadas geográficas (latitud y longitud), la fecha y hora del evento. Este paquete es enviado al servidor a través de una API REST implementada en FastAPI, donde queda en espera para ser procesado.

El **backend** centraliza la comunicación entre los distintos componentes del sistema, gestionando la recepción de datos, la autenticación de usuarios y el procesamiento de cada imagen. El flujo comienza al recibir el paquete desde la aplicación móvil, el cual se transforma a un objeto JSON (ilustración 2) y luego se envía a una cola RabbitMQ, donde es procesado por el módulo de inteligencia artificial encargado de detectar irregularidades viales. Si se identifica algún tipo de daño, la imagen se guarda y se registra en la base de datos siguiendo el formato ilustrado en la ilustración 3. Por el contrario, si la imagen no contiene ninguna irregularidad, el paquete es descartado para optimizar el uso de recursos.


```
{
  "id": "a7f4b82b-912e-45e2-a2c5-1b7f62c7a92e",
  "image": "c1d93fb8-ceb5-46aa-9fd4-da6e6e5fec1e.jpg",
  "latitude": -33.4792686,
  "longitude": -70.6098035,
  "date": "2024-09-04T17:29:14.000Z",
  "modo": "auto",
  "user": "user_test"
}
```


Ilustración 2 - Formato Punto Enviado App


```
{
  "_id": "66d8d1542b7b07facd5157fd",
  "image_filename": "2f5186ed-9ab6-4cb3-a50c-0a323e229121.jpg",
  "latitude": -33.4926995,
  "longitude": -70.6238845,
  "date": {
    "$date": "2024-09-04T17:29:14.000Z"
  },
  "type": [
    "longitudinal"
  ]
},
```


Ilustración 3 - Formato Actual Punto Procesado

Por último, la **plataforma web**, desarrollada en React y Mapbox GL, permite visualizar los puntos de detección en un mapa interactivo. Mediante una representación basada en colores, similar a un mapa de tránsito donde se muestra la densidad de irregularidades por

calle, facilitando la identificación de zonas críticas y la priorización de intervenciones. Esta plataforma funciona como la interfaz principal de análisis para el usuario, permitiendo explorar los datos y obtener información relevante sobre el estado de la infraestructura vial. Un ejemplo de esta visualización puede apreciarse en la ilustración 4. Además de dicha funcionalidad, la plataforma incorpora herramientas para consultar datos históricos y estadísticas generales del sistema; sin embargo, estas no serán abordadas en detalle en este trabajo.



Ilustración 4 -visualización mapa actual

Sin embargo, tal como se abordó anteriormente, este flujo del sistema presenta una limitación relacionada con la precisión geoespacial de los puntos capturados, ya que depende exclusivamente de las lecturas del sensor GPS del dispositivo móvil. Por lo cual se implementarán mejoras en el flujo e incorporando un módulo correctivo que permita mejorar la precisión de los puntos. A continuación, se abordarán por parte los diferentes cambios y se presentara el módulo correctivo construido.

3.2. Mejoras en la aplicación móvil

La aplicación móvil de Geoviality constituye el punto de origen del flujo de datos del sistema, ya que es la encargada de capturar las imágenes y la información geoespacial asociada. En su versión anterior, la aplicación enviaba únicamente las coordenadas básicas de latitud y longitud, sin un identificador de recorrido ni datos complementarios provenientes de los sensores del dispositivo. Esta limitación tenía dos consecuencias directas:

1. No es posible evaluar la calidad real de cada medición GPS.
2. Los puntos se almacenan como registros aislados, sin pertenecer a una ruta específica, dificultando análisis posteriores y el uso de modelos correctivos basados en trayectoria.

Para superar estas limitaciones, se implementó una mejora estructural en el paquete de datos enviado al backend. En primer lugar, la aplicación ahora genera un identificador único de ruta (route_id) cada vez que el usuario inicia un recorrido. Este identificador permite agrupar los puntos pertenecientes a una misma trayectoria, habilitando análisis espaciales más avanzados y, en particular, el uso de un filtro de partículas para corregir la ruta completa una vez finalizada.

Además del ID de ruta, la aplicación incorpora ahora un conjunto ampliado de mediciones provenientes del receptor GNSS y de los sensores inerciales del dispositivo. El nuevo paquete de datos incluye los siguientes campos:

- latitude, longitude, altitude: coordenadas geográficas entregadas por el receptor GNSS.
- accuracy_m: precisión estimada del receptor en metros.
- speed_mps: velocidad instantánea del vehículo.
- heading_deg: rumbo o dirección de desplazamiento.
- accel_x, accel_y, accel_z: aceleraciones medidas por el acelerómetro.
- gyro_x, gyro_y, gyro_z: velocidades angulares medidas por el giroscopio.
- timestamp: instante exacto de la medición.

Este cambio representa una mejora sustancial respecto a la versión anterior, transformando la captura de datos desde un registro geográfico mínimo a un perfil sensorial completo y estructurado por recorrido, lo que permite caracterizar adecuadamente el movimiento del vehículo y conocer la confiabilidad de cada punto.


```
{
  "_id": "69126c6c67717d05cce06b4c",
  "image_filename": "97d1456e-2190-4e27-ae76-7d05b1b2143e.jpg",
  "latitude": -33.4791614,
  "longitude": -70.6094611,
  "altitude": 581.7999877929688,
  "accuracy_m": 32.52899932861328,
  "speed_mps": 0,
  "heading_deg": 0,
  "accel_x": -0.0087890625,
  "accel_y": 0.4423828125,
  "accel_z": 0.912109375,
  "gyro_x": 0.009773843921720982,
  "gyro_y": -0.0012217304902151227,
  "gyro_z": 0.0012217304902151227,
  "timestamp": {
    "$numberLong": "1762814979085"
  },
  "route_id": "f652a504-7f17-4261-b71e-7ed98bced85b",
  "date": {
    "$date": "2025-11-10T22:51:24.090Z"
  }
}
```


Ilustración 5 - Formato Punto a corregir

El último ajuste realizado en la aplicación corresponde a la frecuencia de captura de coordenadas. Aunque las imágenes se registraban cada 1 segundo, la posición GPS se obtenía cada 5 segundos, generando desfases espaciales significativos entre la ubicación real

del vehículo y el punto almacenado. Para corregir esta inconsistencia, la frecuencia del GPS fue reducida a 1 segundo, sincronizando así la captura de imágenes y datos de localización. En consecuencia, todas las mediciones sensoriales asociadas (velocidad, rumbo, aceleraciones y giroscopios) también se registran en ese mismo intervalo.

En conjunto, estas mejoras convierten la aplicación móvil en un componente capaz de capturar datos de mayor calidad y coherencia, constituyendo la base necesaria para la mejora de precisión geoespacial que se desarrollará en las siguientes etapas del sistema.

Desde la perspectiva del modelo ISO/IEC 25010:2023, estas mejoras fortalecen:

- **Exactitud funcional**: Las mejoras proporcionan datos más completos y confiables.
- **Eficiencia de rendimiento**: Las mejoras facilitaran el procesamiento posterior con modelos más robustos, sin la necesidad de aumentar la exigencia del software.
- **Confiabilidad**: Al poseer datos más completos, se evitarán pérdidas de datos, se mejorará la continuidad y reducirá la sensibilidad a lecturas erróneas.

3.3. Mejoras en el backend y en la plataforma web

La ampliación del conjunto de datos enviados por la aplicación móvil hace que se requieran ajustes importantes en el backend y en la plataforma web para aprovechar esta nueva información y fortalecer la precisión geoespacial del sistema. Tanto la capa de procesamiento como la de visualización se actualizan para habilitar la corrección posterior de coordenadas y una representación más detallada del entorno urbano.

En el backend, una primera mejora consiste en almacenar las rutas completas utilizando el route_id como clave principal. Este cambio permite conservar la secuencia temporal de los puntos, lo que habilita el uso de metodologías basadas en trayectoria, como el filtro de partículas Map-Aware propuesto en este trabajo. De esta manera, el backend deja de trabajar solo con puntos aislados y pasa también a manejar recorridos completos, lo cual facilita la aplicación del módulo correctivo.

Un segundo cambio relevante se relaciona con la estructura del GeoJSON de calles utilizado por el sistema. En la versión anterior, las calles aparecían representadas como tramos extensos, dificultando la asignación precisa de puntos a segmentos específicos. Para abordar este problema, el GeoJSON se reestructura en tramos equivalentes a una cuadra, generando un mapa vial más granular. Esta segmentación mejora la interpretación de los datos y permite asociar irregularidades a segmentos concretos, en lugar de a calles completas.

Lo anterior afecta directamente a la visualización en la plataforma web, ya que pasa a mostrar la ciudad dividida en tramos más pequeños, cada uno representado como una

entidad individual en el mapa. Esto permite una visualización más detallada de la red urbana y la capacidad de realizar análisis por tramo (ilustración 6).

De esta forma, el backend se transforma en un componente que no solo almacena, sino que preprocesa y organiza la información geoespacial, proporcionando una base más robusta para la etapa correctiva posterior



Ilustración 6 - Mapa Ordenado Por Cuadra/Sector

3.4. Diseño e Integración del módulo correctivo

El módulo correctivo constituye un componente especializado orientado a mejorar la precisión geoespacial de las rutas registradas por Geoviality. A diferencia del flujo original del sistema, en el cual cada punto GPS es procesado únicamente para la detección y visualización de baches, este módulo opera de forma independiente y posterior a la finalización del recorrido. Esto permite corregir rutas completas una vez capturadas, ajustando consecuentemente la posición de los puntos representados en el mapa.

Este enfoque asegura que el funcionamiento principal del sistema se mantenga intacto, evitando impactos negativos en el rendimiento general. De esta manera, la corrección geoespacial se incorpora como un proceso controlado y preciso, alineado con los principios de confiabilidad y exactitud definidos por el modelo ISO/IEC 25010:2023.

Diseño del módulo correctivo

El módulo ha sido implementado como un **Map-Aware Particle Filter (PF)**, es decir, un filtro de partículas que combina la información GNSS, los datos inerciales del dispositivo móvil y el contexto geoespacial proporcionado por el mapa vial de la ciudad. Este enfoque permite mejorar la calidad posicional de las rutas/puntos a partir de tres pilares:

- *Modelado del movimiento del vehículo*: El filtro utiliza los nuevos datos registrados por la aplicación móvil, velocidad (speed_mps), rumbo (heading_deg), aceleración y timestamp, para modelar la dinámica del vehículo. Con esta información predice la posición esperada en cada instante temporal y genera múltiples hipótesis (partículas) que representan ubicaciones posibles. Para este caso se ocupan 1200 partículas por punto, lo cual asegura un equilibrio entre precisión y costo computacional.
- *Corrección basada en la observación GNSS*: Cada partícula se compara con la observación GPS bruta recibida en ese punto. Es en este momento es que, a través de una función de probabilidad gaussiana, el filtro asigna mayor peso a las partículas más cercanas a la medición y descarta aquellas que sean inconsistentes. Sumado a lo anterior, esta etapa también suaviza ruidos esporádicos o lecturas inestables.
- *Ajuste utilizando el mapa vial (Map-Aware):* Una vez que se tienen las partículas, se aplica una mejora adicional, la cual es el uso del mapa urbano seccionado en tramos de calle. Esto significa que para cada partícula:

    - Se identifica el segmento de calle más cercano.
    - Se calcula la distancia lateral a dicho segmento.
    - Se evalúa la coherencia entre el rumbo del vehículo y la orientación de la calle.
    - Se penalizan movimientos físicamente improbables, como la circulación en contra de un sentido único.

Estos mecanismos permiten que el filtro considere la estructura real de la ciudad, favoreciendo posiciones plausibles para un vehículo en movimiento y reduciendo la probabilidad de asignaciones incorrectas hacia calles adyacentes. El resultado final del proceso es una secuencia de posiciones corregidas, cuyas coordenadas han sido suavizadas por el filtro de partículas y posteriormente ajustadas al eje central de la calle más probable.

Integración en Geoviality

La integración del módulo correctivo es un elemento importante de este trabajo, ya que en los objetivos se busca no afectar el rendimiento actual, por lo cual el módulo es activado por el usuario desde la vista principal. El flujo propuesto es el siguiente:

- Finalización de ruta: Al finalizar la ruta, se envía un paquete de datos en donde se encuentra el id de la ruta, su date y un estado. Lo anterior se hace con el objetivo que tener un registro donde se encuentren las rutas ya finalizadas y por consiguiente disponibles a corregir. Aun así, se debe tener en cuenta que el proceso de la detección de baches requiere algunos segundos adicionales por punto.

- Ejecución del módulo correctivo: En la vista principal de la web, el usuario podrá ejecutar el módulo correctivo siempre que existan rutas disponibles a procesar. Al ejecutar el backend toma las rutas una por una para su corrección, lo cual genera una nueva versión corregida de la ruta. Esta ruta es guardada y utilizada para encontrar coincidencias con puntos en donde se encontraron baches y cambiar su posición a la versión corregida.

- Revisión de puntos: Una vez corregida la ruta, se realiza una comparación entre la calle asignada originalmente a cada punto y la calle asignada en la versión corregida. Esta comparación se efectúa utilizando el identificador del segmento de calle (*way_id*) presente en el GeoJSON. En los casos donde ambas asignaciones difieren, la ubicación original del punto es reemplazada por la posición corregida, garantizando una asignación más precisa.

- Visualización del resultado en la plataforma web: La visualización general del mapa se mantiene sin cambios en su lógica ni en los esquemas de color previamente definidos. Sin embargo, los puntos corregidos se reflejan automáticamente en el mapa, mejorando la representación espacial de las detecciones sin modificar la experiencia de uso del sistema.

4. Resultados

A continuación, se exponen los resultados obtenidos tras la implementación del módulo correctivo propuesto para mejorar la precisión geoespacial del sistema Geoviality. Con el fin de evaluar el desempeño de la solución, se analizaron diversas rutas reales capturadas mediante la aplicación móvil, a las cuales se les aplico posteriormente el algoritmo correctivo sobre cada una de ellas. Para cada ruta se compararon tres versiones: los puntos GPS originales, la estimación obtenida mediante el filtro de partículas sin información cartográfica y la versión corregida utilizando el filtro consciente del mapa (Map-Aware).

La presentación de los resultados se organiza en dos partes. Primero, se muestran visualizaciones comparativas de distintas rutas representativas, lo que permite observar de manera cualitativa las rutas antes y después de aplicar la corrección. Posteriormente, se presentan métricas cuantitativas que permiten evaluar el grado de mejora en términos de precisión, coherencia espacial y suavidad de las trayectorias. Estas métricas se relacionan con

las características de calidad establecidas en el modelo ISO/IEC 25010:2023, para analizar el impacto de la solución desde la perspectiva de la ingeniería de software. Finalmente se muestra la comparación en el sistema Geoviality, específicamente en la visualización.

4.2. Visualizaciones comparativas

Se presentan a continuación visualizaciones comparativas de distintas rutas reales capturadas mediante la aplicación móvil Geoviality. Cada visualización muestra de manera simultánea tres representaciones del recorrido:

1. **Ruta GPS original**, correspondiente a los puntos crudos entregados por el dispositivo móvil.
2. **Ruta corregida mediante Particle Filter sin mapa**, que utiliza únicamente la dinámica del movimiento (rumbo, velocidad y tiempo).
3. **Ruta corregida mediante el Map-Aware Particle Filter**, que integra la red vial segmentada como restricción espacial y de orientación.

Estas comparaciones permiten observar de manera cualitativa los efectos del proceso de corrección. En particular, se busca evidenciar: la magnitud del error transversal presente en las mediciones GNSS originales, el comportamiento del filtro de partículas y el ajuste final sobre las calles.

4.2.1. Ruta 1

La primera ruta corresponde a un tramo en un sector urbano con edificaciones cercanas que generan un nivel moderado de multipath, principalmente al inicio de la ruta. Además, esta no posee demasiadas calles laterales, por lo cual esta ruta es adecuada para observar cómo se desplazan lateralmente los puntos GPS crudos y cómo el módulo correctivo reduce de forma progresiva el error transversal en sectores no saturados.



Ilustración 7 - Ruta 1

En las imágenes anteriores se visualiza que el GPS original (ruta roja) los puntos presentan un desplazamiento lateral respecto al eje de la calle, lo que coincide con las métricas presentadas posteriormente. Al costado de esta se ubica el filtro de partículas (ruta azul) junto a la ruta con Map-Aware (ruta verde). El filtro de partículas logra corregir en la mayoría de los casos el error de los datos del GPS original, pero aún se observan puntos fuera del mapa (aunque por muy poco), pero el proceso Map-Aware termina corrigiendo lo anterior para lograr que todos los puntos se ubiquen sobre una calle, disminuyendo el error al completo.

4.2.2. Ruta 2

La segunda ruta corresponde a un tramo en un sector urbano con edificaciones de baja altura que generan un nivel bajo de multipath. En cambio, se aumentan los cruces transversales en la recta, lo cual es importante a la hora del funcionamiento del sistema. Por lo cual esta ruta es adecuada para observar la corrección en áreas con mayor probabilidad de que se asignen irregularidades a otra calle.

En la imagen 8 se visualiza que el GPS original (ruta roja) los puntos presentan un desplazamiento lateral respecto al eje de la calle, pero a diferencia de la ruta anterior, en este si existen puntos que coinciden con calles perpendiculares y el proceso correctivo cambia esos puntos a la calle correspondiente, tal como se observa en las rutas azul y verde.



Ilustración 8 - Ruta 2

4.3. Análisis cuantitativo

4.3.1. Ruta 1

La aplicación del método correctivo en la ruta 1 se ejecutó en 5.986 segundos y posee los siguientes resultados numéricos:

Método	MAE	RMSE	Mediana	P90	P95	E.max
Gps - Calle	4,717 m	7,100 m	4,053 m	9,411 m	14,346 m	26,464 m
PF - Calle	0,503 m	1,540 m	0,161 m	0,904 m	1,571 m	10,600 m
Map - Calle	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,000 m

Por lo cual la mejora absoluta lograda con el método correctivo aplicado es:

- Mejora media: 4,717 m.
- Mejora mediana: 4,053 m.
- Máxima corrección: 26,464 m.
- Porcentaje de casos mejorados: 100% (59/59 puntos).

A partir de estos datos podemos decir que en la ruta 1:

- Los datos originales provenientes del GPS contienen errores laterales de varios metros, con un máximo de 26 metros en algún punto. Esto es esperable conociendo el comportamiento de las señales geoespaciales.
- El filtro de partículas cumple con el objetivo de disminuir el error a un nivel submétrico en la mayoría de los puntos, sin embargo, comete errores puntuales, al menos en esta ruta.
- La aplicación del Map-Aware disminuye completamente el error lateral, alineando el 100% de los puntos a la calle correcta.

4.2.2. Ruta 2

La aplicación del método correctivo en la ruta 2 se ejecutó en 5.492 segundos y produjo los siguientes resultados numéricos:

Método	MAE	RMSE	Mediana	P90	P95	E.max
Gps - Calle	3.970 m	4.168 m	4.250 m	5.334 m	5.587 m	5.964 m
PF - Calle	0.195 m	0.389 m	0.100 m	0.404 m	0.641 m	2.161 m
Map - Calle	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,000 m	0,000 m

Por lo cual la mejora absoluta lograda con el método correctivo aplicado es:

- Mejora media: 3,970 m.
- Mejora mediana: 4,168 m.
- Máxima corrección: 5,964 m.
- Porcentaje de casos mejorados: 100% (50/50 puntos).

A partir de estos datos podemos decir que en la ruta 2:

- Los datos originales provenientes del GPS contienen errores laterales de algunos metros, pero de menor magnitud que la ruta 1.
- Tal como la primera ruta, el filtro de partículas cumple con el objetivo de disminuir el error a un nivel submétrico en la mayoría de los puntos.
- La aplicación del Map-Aware disminuye completamente el error lateral, alineando el 100% de los puntos a la calle correcta.

Es importante aclarar que los valores nulos obtenidos en la métrica Map – Calle no implican una ausencia total de error en la estimación de la posición real del vehículo. En este caso, el valor 0,00 m se debe a que, tras la aplicación del módulo correctivo, cada punto es ajustado explícitamente al segmento de calle más probable dentro del GeoJSON, asignándolo al eje central de dicho tramo.

Por lo tanto, la métrica Map – Calle mide la distancia lateral entre el punto y la calle asignada, la cual se vuelve nula por definición una vez que el punto es proyectado sobre la geometría vial. Este resultado refleja la correcta asignación de los puntos a la calle correspondiente, más que una mejora absoluta en la exactitud métrica del posicionamiento GNSS. En la siguiente sección se analiza la mejora considerando únicamente el efecto del filtro de partículas, sin incorporar la información del mapa.

4.4. Análisis Global

En total se procesaron 4 rutas diferentes, acumulando 224 puntos GPS analizados. Cada una de ellas representa escenarios reales de uso, como lo son: calles rectas, intersecciones, variaciones de velocidad y distintos niveles de error inherente al GPS del teléfono debido a por ejemplo el efecto multipath, lo cual permite evaluar el desempeño del módulo correctivo de manera integral.
Para cuantificar la mejora, se midió la distancia de cada punto respecto a la calle más cercana en tres estados:

1. GPS original
2. Particle Filter (PF)
3. PF + Map-Aware

Nos concentraremos en la mejora porcentual producida a partir de la aplicación del filtro de partículas, ya que es la mejora más relevante y de la cual se puede lograr un análisis más profundo.

El cálculo la reducción porcentual del error comparando:

$$\text{Mejora (\%)} = 1 - \frac{\text{Error PF}}{\text{Error GPS}}$$

Los resultados en porcentaje de mejora fueron los siguientes:

Métrica	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4	Promedio Global %
MAE	89%	95%	95%	96%	94%
RMSE:	78%	91%	93%	96%	89%
Mediana:	96%	98%	96%	95%	96%
P75:	95%	96%	95%	97%	96%
P90:	90%	92%	92%	96%	93%
P95:	89%	89%	90%	95%	91%
E. Max:	60%	64%	88%	91%	76%

Los porcentajes de mejora muestran de forma consistente que el módulo correctivo basado en Particle Filter + Map-Aware aporta un beneficio significativo sobre las posiciones GPS sin corregir. En particular, métricas robustas como MAE, Mediana y P75 presentan mejoras promedio superiores al 90%, lo que evidencia que la mayor parte de los puntos son ajustados exitosamente hacia su ubicación real sobre la calle.

En contraste, métricas más sensibles a valores extremos, como el Error Máximo (Max), si bien presentan mejoras importantes (76% en promedio), muestran que en ciertos puntos aislados persisten errores altos debido principalmente a: Segmentos donde el GPS original se alejaba significativamente de la calzada (efecto multipath severo) y situaciones donde el PF predice correctamente la trayectoria, pero el punto GPS puntual cae muy lejos de la vía y requiere una corrección me mayor magnitud. Aun así, ningún caso mostró degradaciones significativas posterior a la corrección, lo cual confirma la estabilidad del algoritmo.

Otra observación importante es que la suavidad frame-to-frame mostró variaciones mínimas entre GPS, PF y PF+MAP. Esto implica que el módulo correctivo no introduce artefactos indeseados como saltos bruscos, oscilaciones o trayectorias discontinuas. Por el contrario, mantiene un movimiento natural y coherente con la dinámica del vehículo, lo cual lo hace adecuado para su uso tanto en análisis posterior como para futuros escenarios de procesamiento en tiempo real, como por ejemplo el uso de las rutas para la conocer que zonas han sido mapeadas en menor cantidad y así priorizarlas para obtener el estado más actual posible.

A pesar de las mejoras obtenidas el módulo tampoco es infalible, ya que, durante el procesamiento completo de los 224 puntos, se identificaron 4 casos en los cuales el punto corregido no quedo exactamente sobre la calle correcta. Estos errores representan apenas un 1,78% del total y se encuentran asociados principalmente a limitaciones del GeoJSON base, el cual contiene geometrías que en algunos sectores no coinciden exactamente con el eje real de la calzada. Esto sugiere que el rendimiento del módulo podría aumentar aún más si se utiliza un archivo vial con mayor precisión cartográfica y que posea una mayor cantidad de puntos por segmento.

Finalmente, el rendimiento observado confirma que el enfoque Map-Aware PF no solo reduce el error promedio, sino que también estabiliza la línea de trayectoria, disminuyendo la variabilidad punto a punto y mejorando la suavidad del recorrido reconstruido. Esto es especialmente relevante para su uso en sistemas de detección de baches, donde pequeñas variaciones pueden afectar la asignación de eventos a su calle correspondiente.

Estos resultados permiten concluir que la integración del módulo correctivo no solo mejora la exactitud posicional, sino que además hace más confiable y útil la ruta final para la corrección de los puntos que si poseen eventos en la interfaz principal.

4.5. Incorporación Geoviality

La integración del módulo correctivo dentro de la plataforma Geoviality permite observar de manera directa el impacto que tiene la corrección geoespacial sobre la calidad de los puntos visualizados. Para ello, se comparó el comportamiento del sistema en ambos escenarios:

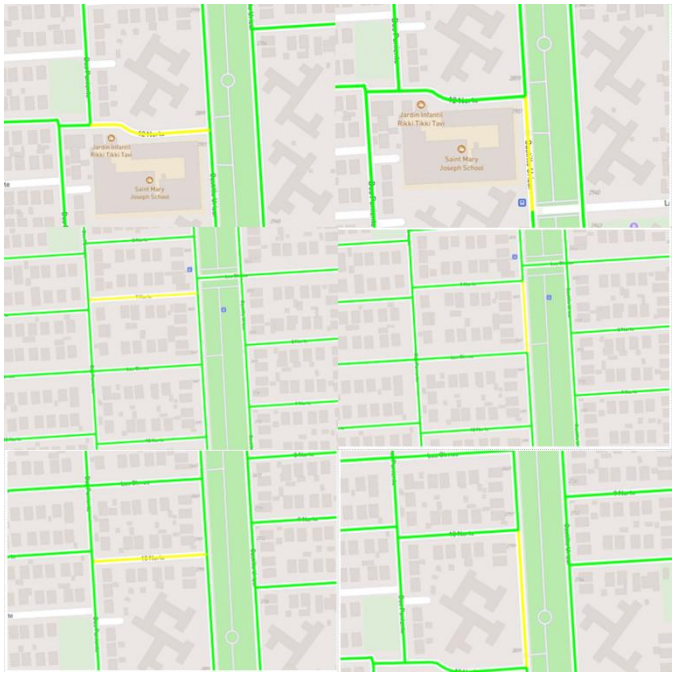


Ilustración 9 - Geoviality sin modulo(izq) - Geoviality con modulo (der)

En las vistas sin el módulo correctivo(izquierda), los puntos aparecen fuera de la recta, con varios de ellos desviándose hacia calles perpendiculares que se encuentran a pocos metros de distancia. Esto ocurre debido a la ocurrencia de errores ya descritos anteriormente. Lo anterior hace que esa irregularidad se asigne a otra calle que no corresponde, lo cual

puede inducir a errores en el análisis posterior hecho por el usuario encargado de revisarlo.

En esta recta perteneciente a la ruta 2 se registraron 32 puntos GPS, de los cuales 4 a 5 fueron asignados erróneamente a una calle lateral cuando se utilizaba únicamente la posición GPS sin corrección. Esto corresponde a un error del orden del 12% al 15% en la asignación espacial del recorrido.

Al aplicar el módulo correctivo(derecha), la totalidad de esos puntos fueron reposicionados correctamente en la calle principal, eliminando completamente el deslizamiento lateral y la ambigüedad en la geometría de la ruta. Se observa al comparar ambos casos que la asignación se corrige y tiene influencia en la visualización que pueda tener el usuario.

Lo anterior es especialmente relevante en el contexto de Geoviality, dado que una incorrecta asignación espacial de los puntos podría llevar a asociar baches a calles equivocadas, afectando tanto la precisión del diagnóstico vial como la credibilidad del sistema ante los usuarios finales. En este caso específico, si todos esos puntos hubiesen correspondido a baches reales, el módulo correctivo habría evitado que entre un 12% y un 15% de ellos fueran reportados en calles incorrectas.

En consecuencia, no solo se mejora la precisión geométrica, sino también la calidad de los datos operativos, reforzando la confiabilidad del sistema para la gestión municipal y el análisis urbano.

4.6. Análisis de Calidad según ISO/IEC 25010:2023

El análisis se centró exclusivamente en aquellas dimensiones que influyen de manera directa en la precisión de los datos, el comportamiento temporal del sistema y la confiabilidad global de la plataforma, las cuales ya se habían abordado anteriormente:

4.6.1. Functional Suitability

La introducción del módulo correctivo mejora de manera significativa la capacidad del sistema para entregar resultados que representan con mayor fidelidad la posición real del vehículo en las calles. Los resultados obtenidos muestran reducciones sistemáticas del error GPS luego del ajuste con mapa, lo que se traduce en una mejora directa en la exactitud funcional del sistema. En el escenario que se analizó previamente tiene hasta un 15% de los puntos que podrían haber aparecido en calles incorrectas, con el consecuente riesgo de generar falsos positivos en la detección de baches, la aplicación del módulo corrige la totalidad de esos desvíos,

asegurando que las lecturas coincidan con la calle donde realmente se desplazó el vehículo.

La completitud funcional también se ve fortalecida, ya que el sistema no solo registra datos GPS, sino que ahora incorpora un mecanismo dedicado a corregirlos, ampliar la robustez de la captura y aumentar el valor analítico de cada recorrido enviado desde la aplicación móvil. Esto permite que Geoviality cumpla de forma más adecuada su objetivo central.

4.6.2. Performance Efficiency

El módulo correctivo se ejecuta en un proceso asíncrono posterior al registro de la ruta, por lo que no afecta el rendimiento inmediato de la aplicación móvil ni a la visualización inmediata en la web. Este enfoque permite mantener tiempos de respuesta adecuados en el flujo normal del sistema, mientras que el procesamiento de la corrección puede escalar sin comprometer la interacción directa con el usuario.

Desde la perspectiva del comportamiento temporal, el algoritmo demuestra consistencia: el procesamiento de cada ruta se mantiene dentro de un rango aceptable dado el tamaño de los datasets, y el uso de estructuras espaciales como STRtree asegura que la búsqueda de calles cercanas permanezca eficiente incluso cuando aumente el universo de calles analizadas. Esto significa que el sistema puede seguir operando bajo cargas mayores sin degradar su rendimiento perceptible, cumpliendo así con los requisitos de eficiencia esperados de un backend urbano en tiempo real.

4.6.3. Reliability

La incorporación del módulo correctivo incrementa de manera notable la confiabilidad del sistema, dado que reduce la propagación de errores que provienen de sensores GPS. Al suavizar trayectorias, restringir el movimiento a vías existentes y ajustar automáticamente puntos que caen fuera de la calle real, el sistema se vuelve más resistente tanto a ruido aleatorio como a condiciones adversas como lo es el multipath o baja señal satelital.

La tolerancia a fallos queda explicitada en la capacidad del algoritmo para manejar inconsistencias entre velocidad, rumbo y posición GPS: incluso datos parcialmente erróneos pueden ser corregidos por la combinación partículas + mapa, evitando colapsos en la interpretación del recorrido. En la evaluación global (224 puntos), solo 4 lecturas presentaron errores residuales debido principalmente a limitaciones del GeoJSON, no a fallos del modelo, lo que demuestra una operación estable y repetible.

Cada ejecución del módulo correctivo produce resultados consistentes, reduciendo variabilidad y evitando que errores individuales afecten las decisiones posteriores del sistema. Esto fortalece la fiabilidad del sistema completo y lo acerca al comportamiento esperado en aplicaciones urbanas de monitoreo.

5. Conclusión

La incorporación del módulo correctivo basado en un enfoque *Map-Aware Particle Filter* permitió abordar eficazmente una de las principales limitaciones del sistema Geoviality: la imprecisión asociada a las lecturas GPS provenientes de teléfonos móviles. Al integrar más variables de medición y un modelo probabilístico guiado por la geometría vial, fue posible generar trayectorias corregidas con un nivel de exactitud significativamente superior al de los datos originales.

Los experimentos realizados sobre cuatro rutas reales evidenciaron mejoras consistentes en todas las métricas evaluadas, alcanzando reducciones de error superiores al 90% en promedio para MAE, Mediana y percentiles altos. Esto demuestra no solo la efectividad del enfoque Map-Aware, sino también su estabilidad ante distintos escenarios de desplazamiento urbano.

Desde la perspectiva del modelo de calidad ISO/IEC 25010:2023, la solución propuesta contribuye directamente a mejorar la Adecuación Funcional al entregar resultados más exactos y completos; mantiene un buen rendimiento al operar como un módulo discreto activado por el usuario; y aumenta la Confiabilidad del sistema al corregir lecturas erróneas y suavizar fluctuaciones propias del GPS.

La comparación visual entre el antes y el después muestra su impacto practico: en zonas donde entre un 12% y un 15% de los puntos se ubicaban en calles incorrectas, el módulo logro corregirlos completamente. En un escenario real, esto equivale a evitar falsos positivos y prevenir asignaciones incorrectas de baches, mejorando la interpretación y utilidad de la información para la gestión urbana.

En conjunto, los resultados confirman que la integración de un enfoque Map-Aware no solo mejora la precisión espacial del sistema, sino que también aporta valor en términos de calidad, robustez y consistencia operacional. El módulo correctivo se posiciona como un componente clave dentro de la arquitectura de Geoviality, permitiendo que la plataforma avance hacia un nivel superior de madurez tecnológica y aumentando su potencial para la aplicación real en la gestión urbana y el mantenimiento de las calles.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, amigos y a toda persona que me ha apoyado en este largo proceso para llegar a ser un profesional.

De manera especial quiero agradecer a mi mamá Liliana y mi abuela Luisa (Q.E.P.D), quienes me criaron y me dieron su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Gracias a sus enseñanzas, esfuerzo y dedicación, he podido convertirme en la persona que soy hoy.

Bibliografía

Arulampalam, M. S. (2002). A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 174–188.

BBC. (15 de Enero de 2024). *Potholes: What are they and why are they dangerous?* Obtenido de https://www.bbc.com/news/uk-england-67958426

E. D. Kaplan, C. J. (2006). *Understanding GPS: Principles and Applications.* Norwood, Massachusetts: Artech House.

Groves, P. D. (2008). *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems.* Norwood, Massachusetts, Massachusetts: Artech House.

Gustafsson, F. (2010). Particle filter theory and practice with positioning applications. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 53–82.

International Organization for Standardization. (2011). *Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software quality models.* Ginebra: ISO/IEC.

International Organization for Standardization. (2023). *ISO/IEC 25010:2023 – Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Product quality model.* Geneva: ISO.

ISO. (2011). *ISO/IEC 25010*. Obtenido de ISO25000: https://www.iso25000.com/index.php/normas-iso-25000/iso-25010

ISO/IEC. (2008). *ISO/IEC 25000:2008 – Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Guide to SQuaRE.* Ginebra: International Organization for Standardization.

Liu, A., Guo, H., Yu, M., Xiong, J., Liu, H., & Xie, P. (2024). Research on GNSS/IMU/visual fusion positioning based on adaptive filtering. *Applied Sciences*.

Misra, P., & Enge, P. (2011). *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance.* Massachusetts: Ganga-Jamuna Press.

Quddus, M. A. (2003). A general map matching algorithm for transport telematics applications. *GPS Solutions*, 157–167.

Rechy Romero, A., Borges, P., Pfrunder, A., & Elfes, A. (2018). Map-Aware Particle Filter for Localization. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (págs. 1–8). Brisbane: IEEE.

Scolamiero, V., Boccardo, P., & La Riccia, L. (2025). Mobile Mapping System for Urban Infrastructure Monitoring: Digital Twin Implementation in Road Asset Management. *Land*, 597. doi:10.3390/land14030597

Weng, D., Chen, W., Ding, M., Liu, S., & Wang, J. (2025). Sidewalk matching: a smartphone-based GNSS positioning technique for pedestrians in urban canyons. *Satellite Navigation*, 4.

Xu, G. (2007). *GPS: Theory, Algorithms and Applications.* Springer.

Zandbergen, P. A. (2009). Accuracy of iPhone locations: A comparison of assisted GPS, WiFi and cellular positioning. *Transactions in GIS, 13*(s1), 5–25. doi:10.1111/j.1467-9671.2009.01152.x